



Elinkeino-, liikenne- ja
ympäristökeskus



**Euroopan unionin
osarahoittama**

KIELO - Kiertotalousloikka rakennusmateriaalien uudelleenkäytön parantamiseksi Mikkelissä

KUULUMISIA JA TULEVAA BIO- JA KIERTOTALOUDESTA

Ympäristöturvallisuuden ja vesiteknologian tutkimusryhmän webinaari 8.4.2025

Projektitutkija Henri Kettunen, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Purkutyömaan kuvaaminen droonilla

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

South-Eastern Finland University of Applied Sciences

www.xamk.fi



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Miksi kuvata purkutyömaata droonilla?

Ilmakuvaus droonilla on helposti käyttöönotettava dokumentointimenetelmä

- Työmaan tilanteen valvonta ja raportointi sidosryhmille visuaalisesti
- Työturvallisuus voi parantua aineistoista tehdyillä huomioilla
- Työjärjestyksen ja logistiikan suunnittelu

Kiertotalousvaatimukset tiukentuvat tulevaisuudessa

- Purkumateriaalien kierrätystarve kasvaa
- Tieto purkumateriaalien määristä on saatava nopeasti
- Dronilla mahdollista arvioida materiaalien tilavuus ja massa jo purkutyön aikana fotogrammetriaa hyödyntäen
 - Tulevaisuudessa ei tarvetta kuljettaa purkumateriaaleja punnittavaksi
 - Purkamisen hiilijalanjälki pienenee



Drooneja koskeva lainsäädäntö lyhyesti

Avoin toimintakategoria vs. erityinen toimintakategoria

Avoin: Lennätys aina näköyhteydessä (VLOS) ja max 120 m korkeudella (aluekohtaiset rajoitukset huomioiden)

Jos droonissa on kamera, on käyttäjän rekisteröidyttävä Traficomin dronetoimijarekisteriin. A1/A3-verkkoteoriakoe pakollinen, jos massa > 250 g.

Lennättäminen ihmisten lähellä: kevyimmät droonit, A1-alakategoria

- Laitteen massa < 900 g, C0- tai C1-merkintä
- $m < 250$ g (C0) → aina mahdollista lennättää ihmisten päällä (EI ihmisjoukko)
- 250–899 g (C1) → vältettävä toimintaa ihmisten yläpuolella
”Voit lennättää yksittäisten ihmisten lähellä, yli lennättämistä tulisi kuitenkin välttää” (Droneinfo 2025).



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Käytetty laitteisto

Drooni: DJI Mini 3 Pro

- Massa < 250 g → A1-alakategoria
- Kamera 12 megapikseliä / 1/1.3" CMOS-kenno
- Lentoaika yhdellä akulla ~34 min
- Max tuulennopeus 10,7 m/s

Lennon suunnittelu: Dronelink-sovellus

- Fotogrammetrian mahdollistamiseksi

Kauko-ohjain: DJI RC Pro

- Voidaan asentaa 3. osapuolten sovelluksia!
- Näyttö 1080p / 60 fps / 1000 nits
- Käyttöaika ~3 h

→ Hinta yht. ~2000 €



Purkutyömaiden ”vapaa” ilmakuvaus



XAMK
Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Fotogrammetria ilmakuvista

Systemaattisesti kuvaamalla kohteesta voidaan mallintaa erilaisia mittatarkkoja aineistoja

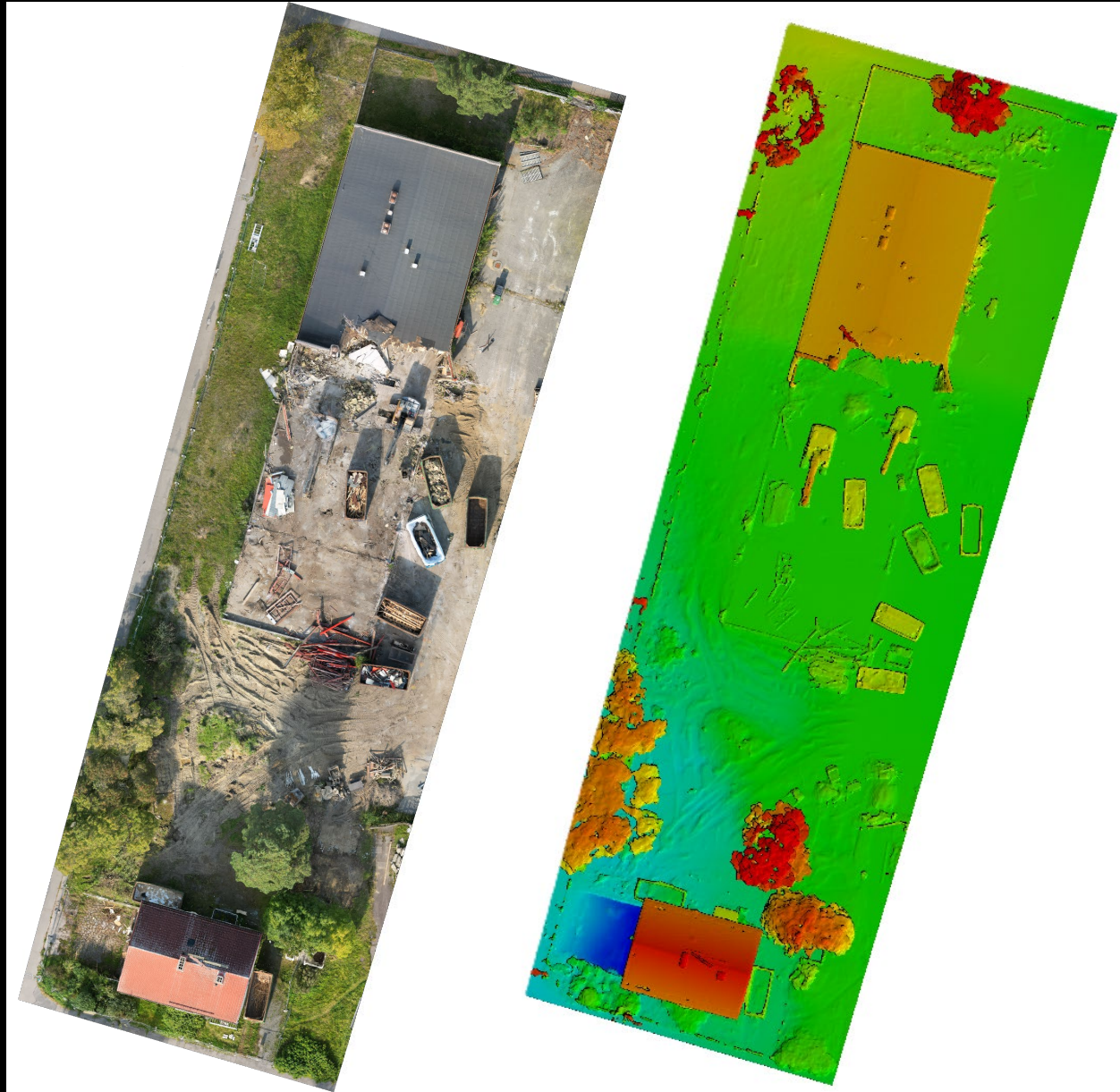
- 2D-aineistot: Ortoilmakuva, digitaalinen pintamalli (DSM)
 - Näkymä ylhäältä alas
- 3D-aineistot: Pistepilvi, mesh (teksturoitu 3D-malli)
 - Näkymä voidaan itse valita

Aineistoista voidaan tehdä erilaisia mittauksia ja käyttää niitä suunnittelun apuna

- Pituudet, pinta-alat, tilavuudet
 - Esim. kattahuopien tai lasi-ikkunoiden pinta-ala, betonikasan tilavuus...
- Työmaa-aitaelementtien määrä ja sijoittelu, logistiikka työmaalla...



2D-aineistot: ortoilmakuva ja DSM



3D-aineistot: pistepilvi ja mesh



Lennon suunnittelu kuvanhankintaa varten

Perinteisesti double grid-lennätys (DG, skannaus x- ja y-suunnissa)

- Muodostetaan ”ruudukko”, jonka mukaisesti kuljetaan ja kuvataan näkymä asetetuin välimatkoin

Kuvauslennon parametrit:

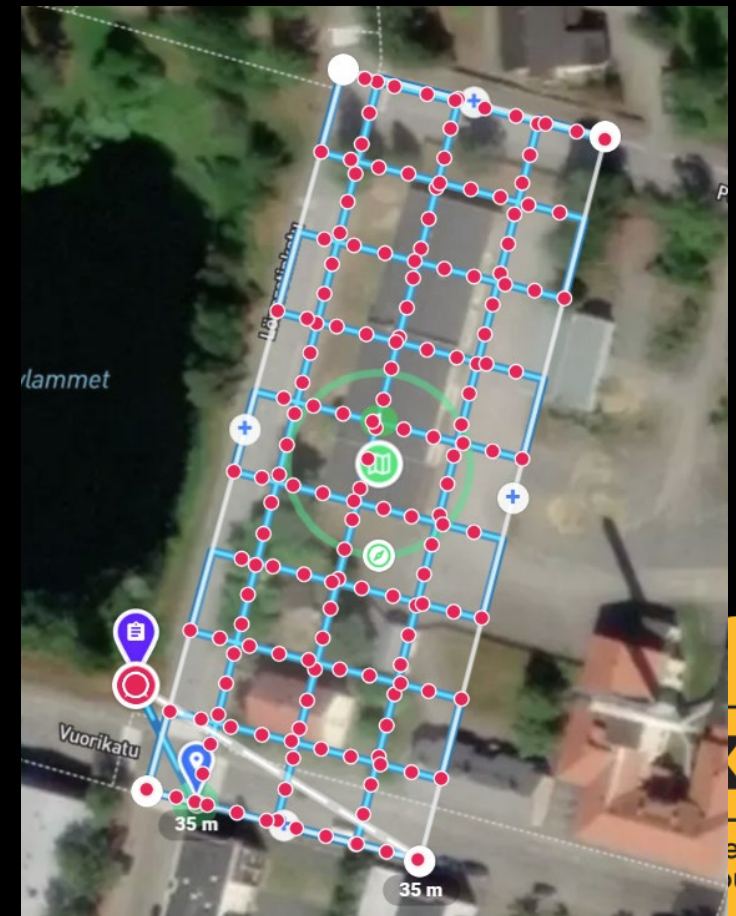
- Overlap/side overlap = kuvien limittäisyys (85 %/75 %)
- Kameran kulma (-65°)
- Korkeus (35–45 m)

Näistä muodostuu GSD-arvo (ground sampling distance)

- Aineistojen resoluutio eli kuvatarkkuus
- Kahden kuvapikselin välinen etäisyys maastossa

Lisäksi huomioitava etenemisnopeus (2,5 m/s)

- Vältetään kuvien heilahdusefektit (motion blur)
- Jos mekaaninen suljin, voidaan edetä nopeammin



Kuvakaappaus Dronelink-sovelluksesta

Vaihtoehto: POI-lennätys (point of interest)

DG-lennätys kestää useita minutteja, riippuen alueen koosta ja käytetystä laitteesta

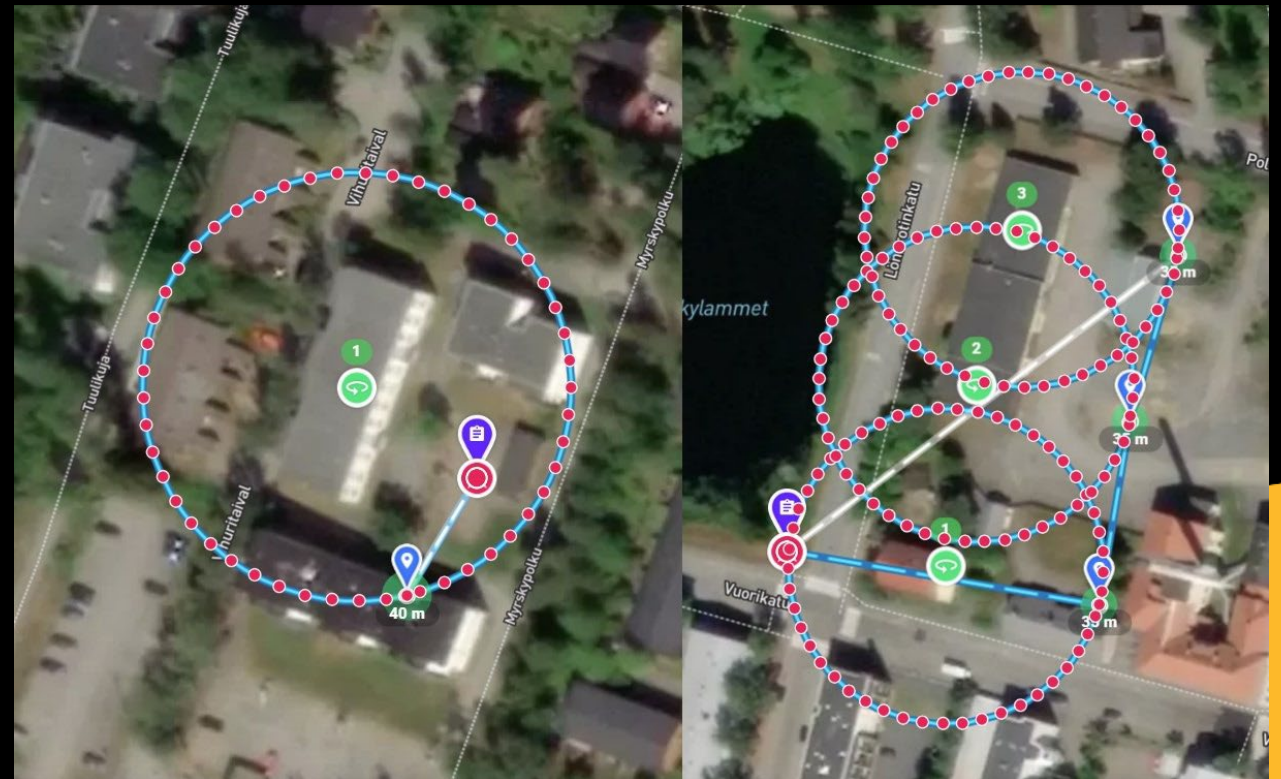
Nopeasti toteutettavaan kuvaukseen voidaan käyttää POI-menetelmää

- Drooni/kamera osoittaa jatkuvasti alueen keskikohtaa ja kiertää sen ympäri

Laajemmalla kohteella voi vaatia useamman POI-ympyrän asettelua

Kuvauslennon parametrit:

- POI-ympyrän säde (40 m)
- Korkeus (35 m...40 m)
- Kameran kulma (-50° ... -55°)
 - Loivempi kuin DG
- Kiertonopeus ($2,5 \text{ m/s} \rightarrow 3,7^{\circ}/\text{s}$)
- Kuvanottoväli (2 s; $7,4^{\circ}$)
 - Noin 50 kuvaa per 360°



Kuvakaappaukset Dronelink-sovelluksesta

Kuvanhankintamenetelmien erot

Vertailtiin kahdella kohteella DG- ja POI-menetelmien käyttöä kuvanhankintaan

	Vihuritaival		ESE-kortteli	
Kuvausmenetelmä	DG	POI (x1)	DG	POI (x3)
Kuvausaika (mm:ss)	7:09	1:38	8:53	5:39
Kuvien määrä (kpl)	102	50	168	153

- POI on huomattavasti DG:tä nopeampi etenkin pienillä kohteilla
- Kerättävien kuvien määrä vähenee jopa puoleen
- Alueen koon kasvaessa sekä kuvaukseen kuluva aika että kuvamäärä lähentyvät DG:n vastaavia
- Molempia keinoja voisi vielä optimoida (overlap-arvoja pienemmiksi)
- POI-kuvat voivat kuitenkin olla pelkkinä kuvina hyödyllisempiä (hyvä yleiskuva alueesta, vrt. vapaakuvaus)



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Purkujätelavojen tilavuusmääritykset

Tavoitteena arvioida dronilla kuvatusta aineistosta purkumateriaalin massa lavalla

Tämä on mahdollista määrittämällä lavan tilavuus sen yläpinnasta ja käyttämällä sopivaa irtotiheyskerrointa (lavatiheyskerroin)

- Tiedettävä tyhjän lavan tilavuus

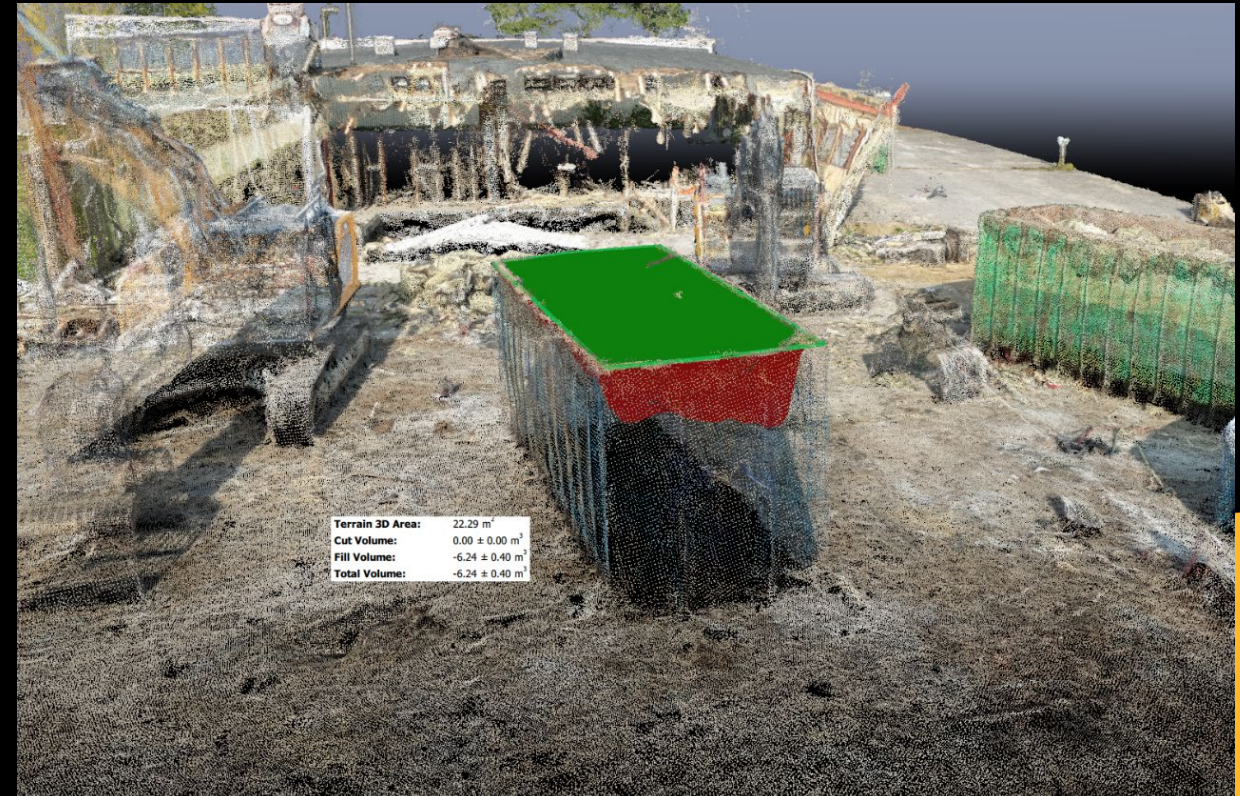
$$V_{\text{materiaali}} = V_{\text{tyhjä}} + V_{3D}$$

$$m_{\text{materiaali}} = \rho_{\text{materiaali}} * V_{\text{materiaali}}$$

↑
irtotiheys

Hankkeen aikana kuvattiin yhteensä 14 punnittua purkujätelavaa

- 6x purkupuu, 4x sekalainen rakennus- ja purkujäte, 3x metalli, 1x kattohuopa



Kuvakaappaus PIX4Dmapper-ohjelmasta

Purkujätelavoista kerätyt tiedot

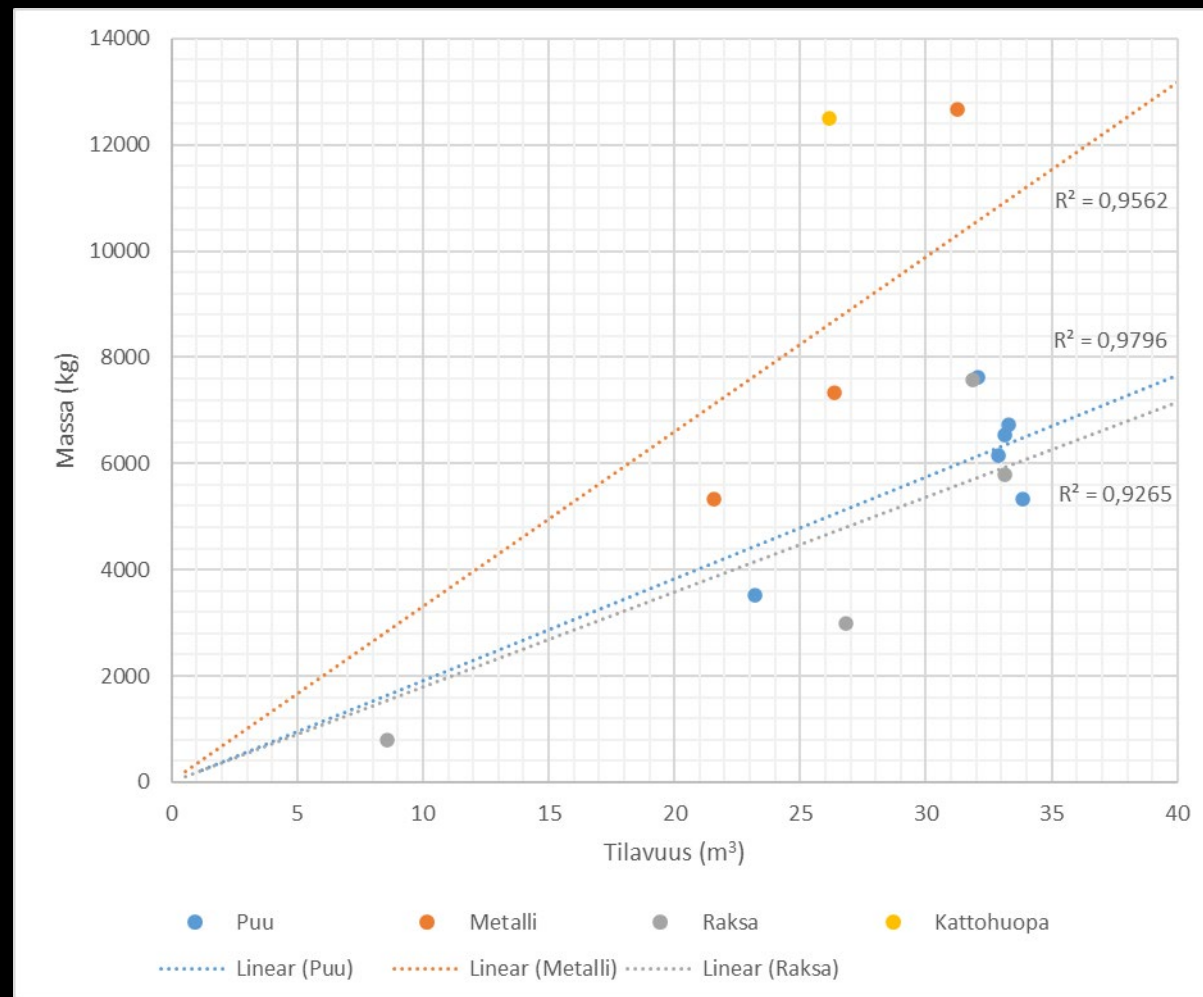
Materiaali	Lavatiheysarvo (kg/m ³)	Keskipoikkeama (± %)
Puu	189	15
Metalli	311	22
Raksa	154	37

Lavan tiivistys kaivurilla aiheuttaa vaihtelua

Hajonta suurta metalleilla ja raksajätteellä

- Metallia = putkia, palkkeja, betoniraudoituksia, peltiä... paljon eri laatuja
- Raksa = sekalaista jätettä alun perin

Dataa tarvitaan enemmän luotettavampien lavatiheysarvojen saavuttamiseksi



Purkujätteiden tunnistaminen ilmakuvista tietokonenäöllä

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu
South-Eastern Finland University of Applied Sciences

www.xamk.fi



Purkumateriaalien tunnistaminen eri sensoreilla

Sensoritasolla purkumateriaalien tunnistamista on tutkittu maailmalla eri menetelmin:

- Multi- ja hyperspektrikamerat, lämpökamerat
 - Aallonpituusriippuvainen reflektanssi → ainekohtainen sormenjälki
- Perinteiset kamerat, RGB-D eli syvyyskamerat
 - RGB-taso/intensiteetti (red, green, blue)
 - HSV-arvot (hue, saturation, value)
 - Näiden liitoshistogrammit ”tunnistuskirjastona”
- Tietokonenäkö edellä mainittuja hyödyntäen
 - Esim. robottikouralla tapahtuva lajittelu liukuhihnalla

Tunnistustulokset olleet hyviä (vrt. asiantuntijan tekemä tunnistus), mutta materiaalit kuvattu läheltä → Miten tunnistus onnistuisi ilmakuvaamalla?



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Objektin tunnistusmalli

Hankkeessa testattiin purkumateriaalien tunnistusta ilmakuvaamalla hankituista valokuvista kouluttamalla objektin tunnistusmalli

- Tietokonenäön sovellutus, jossa identifioidaan objekteja ja niiden sijaintia kuvasta

Tunnistusmalli täytyy kouluttaa, jotta tunnistaminen on mahdollista

- Riittävä määrä kuvia tunnistettavasta asiasta
 - Eri kuvakulmista, eri taustaa vasten
- Tarkasteltavat objektit täytyy merkitä ja nimetä (luokitella)

Valmiille mallille syötetään kuva → Malli palauttaa tiedot:

- Mitkä nimetyt asiat kuvassa on havaittu
- Missä ne sijaitsevat
- Mikä on tunnistusten luottamusarvo (0...1)



Roboflow-sovellus purkumateriaalien tunnistuksessa

Ilmainen internet-selaimella toimiva tietokonenäköpohjainen sovellus, jolle voidaan syöttää valokuvia (datasettejä) ja kouluttaa tunnistusmalli niihin pohjautuen

Kouluttaminen = kuvien annotointi

- Aineistona KIELO-hankkeen ja aiempien hankkeiden ilmakuvia purkutyömailta
- Objektien eli lavojen merkintä, luokittelu jätelajien mukaisesti
- Rajattiin huomioimaan vain lavoille kerätyt purkumateriaalit
- Ei lumipeitteisiä tai muuten epävarmoja materiaaleja
- Yli- ja aliedustavuus: Kuvissa on eräitä materiaaleja huomattavasti enemmän/vähemmän kuin toisia

→ Malli voi suosia päätelmissään enemmän nähtyjä materiaaleja, kun taas vähemmän nähtyjen tapauksessa se epäröi päätelmän luotettavuutta



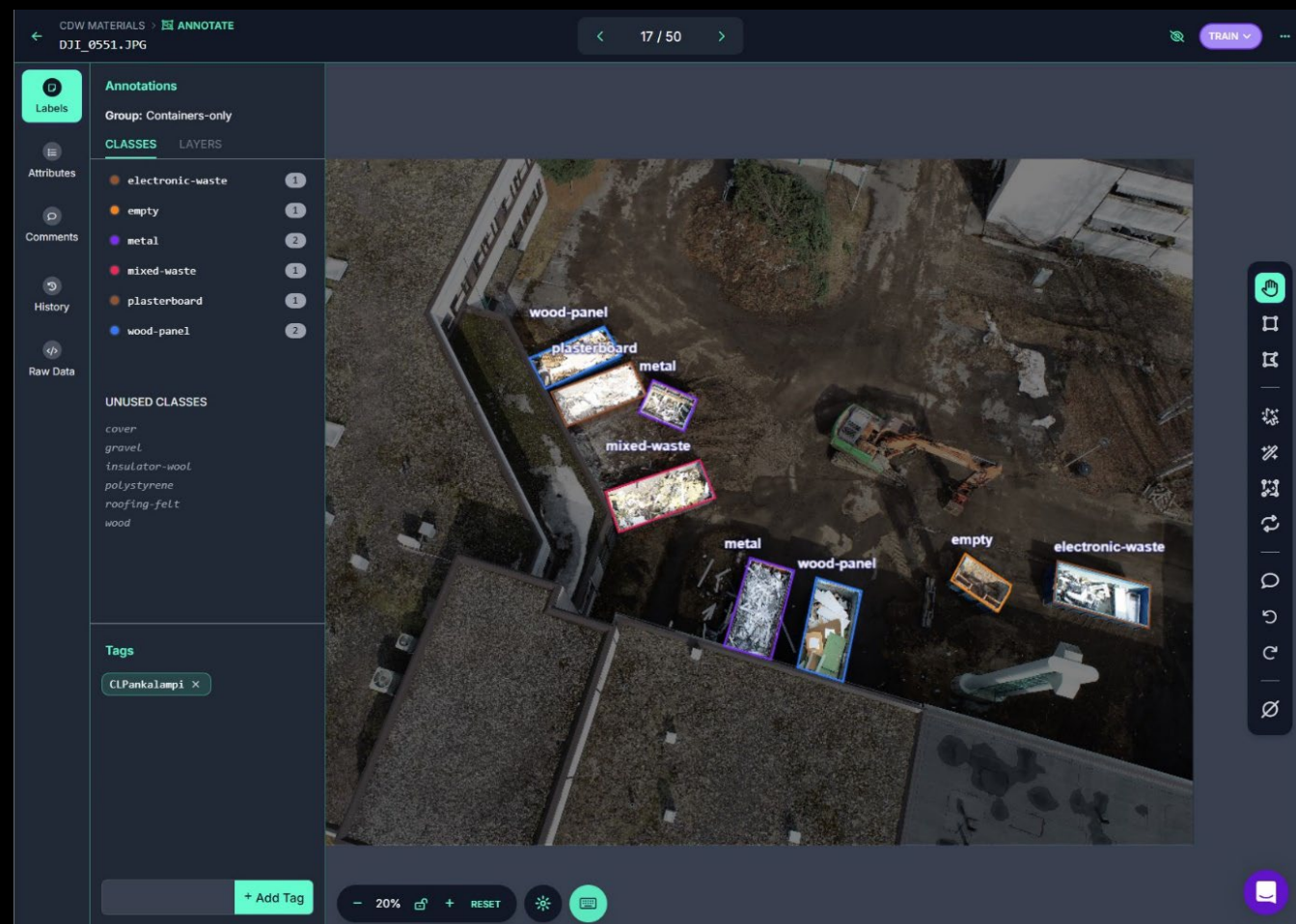
Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Kuva-aineisto

Annotointiin yhteensä noin 2200 valokuvaa, joissa taulukon mukainen määrä purkumateriaaleja

Yhdessä kuvassa yleensä useita laivoja

Materiaali	Lukumäärä (kpl)	Osuus kuvista (%)
Peitetty/suojattu lava	213	9,7
SER-jäte	76	3,4
Tyhjä lava	1 147	52,0
Sora/kiviaines	3	0,1
Eristevilla	395	17,9
Metalli	1 333	60,5
Sekalainen jäte	1 132	51,4
Kipsilevy	192	8,7
Styroksi	371	16,8
Bitumikattohuopa	244	11,1
Purkupuu (lautatavara)	1 778	80,7
Muu puuaines	534	24,2



Kuvakaappaus Roboflow:sta

Tunnistusmallin koulutus

Annotointien jälkeen kuva-aineisto jaetaan osa-aineistoihin

- Koulutusaineisto 70 % // validointiaineisto 20 % // testiaineisto 10 %
 - Koulutus: Varsinainen mallin koulutus, säädetään sisäiset painoarvot
 - Validointi: Mallin suorituskyvyn seuranta koulutuksen aikana, ”hienosäätö”
 - Testi: Koulutuksen jälkeinen testaus (ei käytetä koulutuksessa)

Roboflow:ssa mahdollisuus augmentoida aineistoa ennen varsinaista koulutusta

- Tehdään kuviin pieniä satunnaisia muutoksia, esim. säädetään kirkkautta/saturaatiota/kontrastia, peilataan kuvia x- tai y-suunnassa, muutetaan kuvasuhteita... → Annotoinnit pysyvät kuitenkin paikoillaan
- Parantaa mahdollisesti mallin yleistämiskykyä
- Tässä tapauksessa luotiin vain peilikuvia originaaleista → +1200 kuvaa

Lopullinen aineistojakauma: koulutus 80 % // validointi 13 % // testi 7 %

Varsinainen koulutus Roboflow 3.0 Object Detection Accurate -arkkitehtuurilla



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Mallin suorituskykyarvot

Valmiin mallin suorituskykyarvot Roboflow:n ilmoittamana:

- Herkkyys (recall) 97,8 %
 - Tekeekö malli päätelmän silloin kun pitäisi
- Sisäinen tarkkuus (precision) 92,0 %
 - Kuinka usein päätelmä on oikein luokiteltu
- Keskiarvotarkkuus (mAP) 98,5 %
 - Kaikkien luokkien sisäisen tarkkuuden keskiarvo

HUOM. Arvot perustuvat validointiaineistoon
→ Sisältää kuvia samoilta purkukohteilta, joita on käytetty koulutusaineistossa



Kuvakaappaus Roboflow:sta (validointikuva)

Sekaannusmatriisi

Perustuu testiaineistoon (malli ei ole nähnyt kuvia koulutuksessa missään vaiheessa):

Oikeat päätelmät 94,5 %

Ylimääräiset päätelmät (huti, FP) 3,3 %

Ei päätelmää silloin kun pitäisi (FN) 0,6 %

Suhteessa eniten väärää kipsilevyjen tapauksessa (8 % / 3 kpl)

→ Ehdotti metallia tai sekalaista jätettä

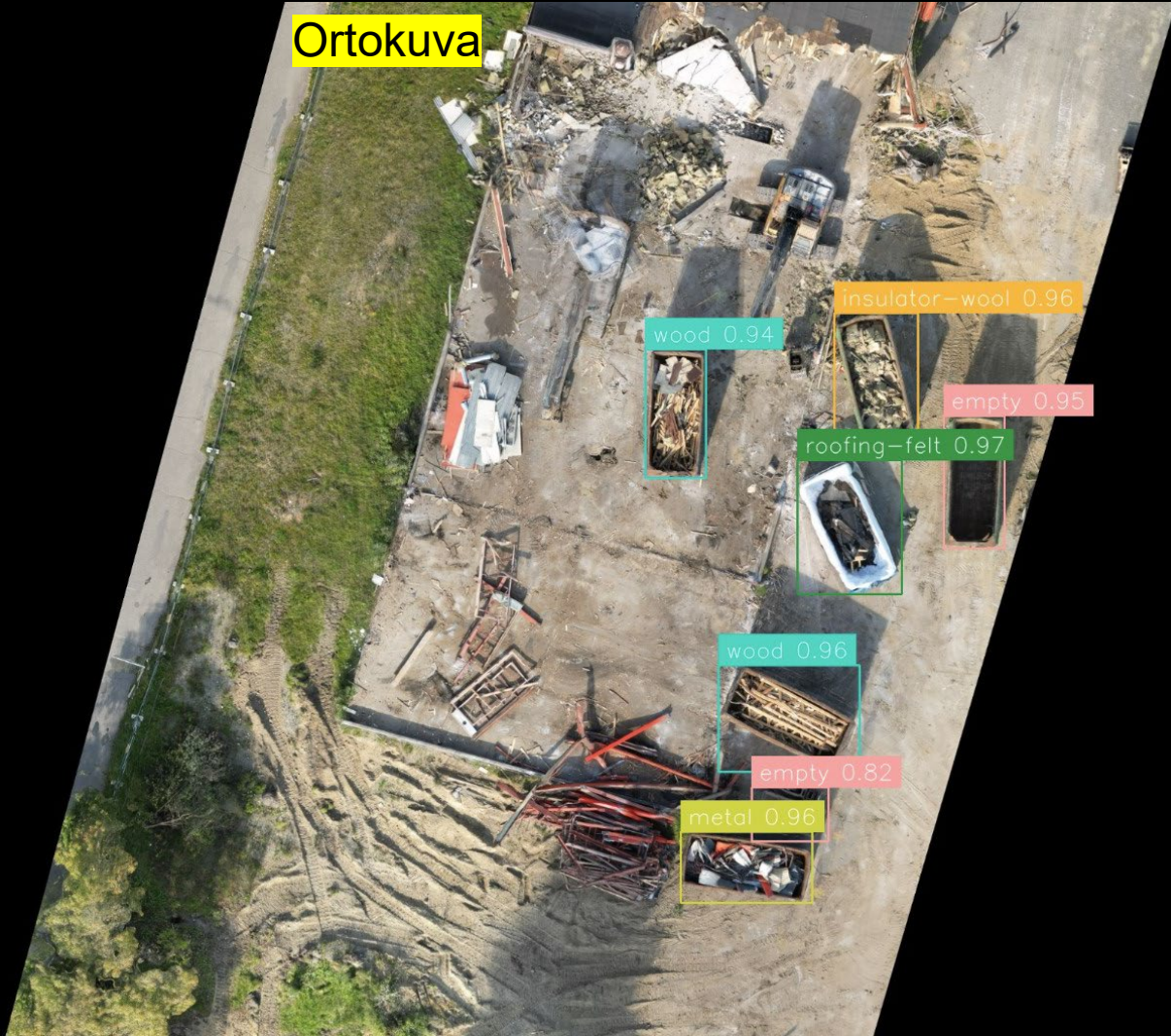
Lähes kaikista luokista huteja, etenkin tyhjistä lavoista

- Helppo kuitenkin havaita vääräksi

		Mallin ennuste												
		Suojapeite	SER-jäte	Tyhjä lava	Sora/kiviaines	Eristevilla	Metalli	Sekalainen jäte	Kipsilevy	Styrox	Kattohuovat	Puu/lauttavara	Puu/muut	False neg.
Todellinen merkintä	Suojapeite	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SER-jäte	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Tyhjä lava	0	0	106	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1
	Sora/kiviaines	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Eristevilla	0	0	0	0	32	0	0	0	0	0	0	0	0
	Metalli	0	0	0	0	0	115	0	0	0	0	0	0	0
	Sekalainen jäte	0	0	0	0	0	1	125	0	1	0	1	0	2
	Kipsilevy	0	0	0	0	0	1	1	23	0	0	0	0	0
	Styrox	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	1
	Kattohuovat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	1	0	0
	Puu/lauttavara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	186	2	1
	Puu/muut	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	54	0
	False pos.	1	1	10	0	1	2	2	0	2	1	5	1	

Mallin testaus

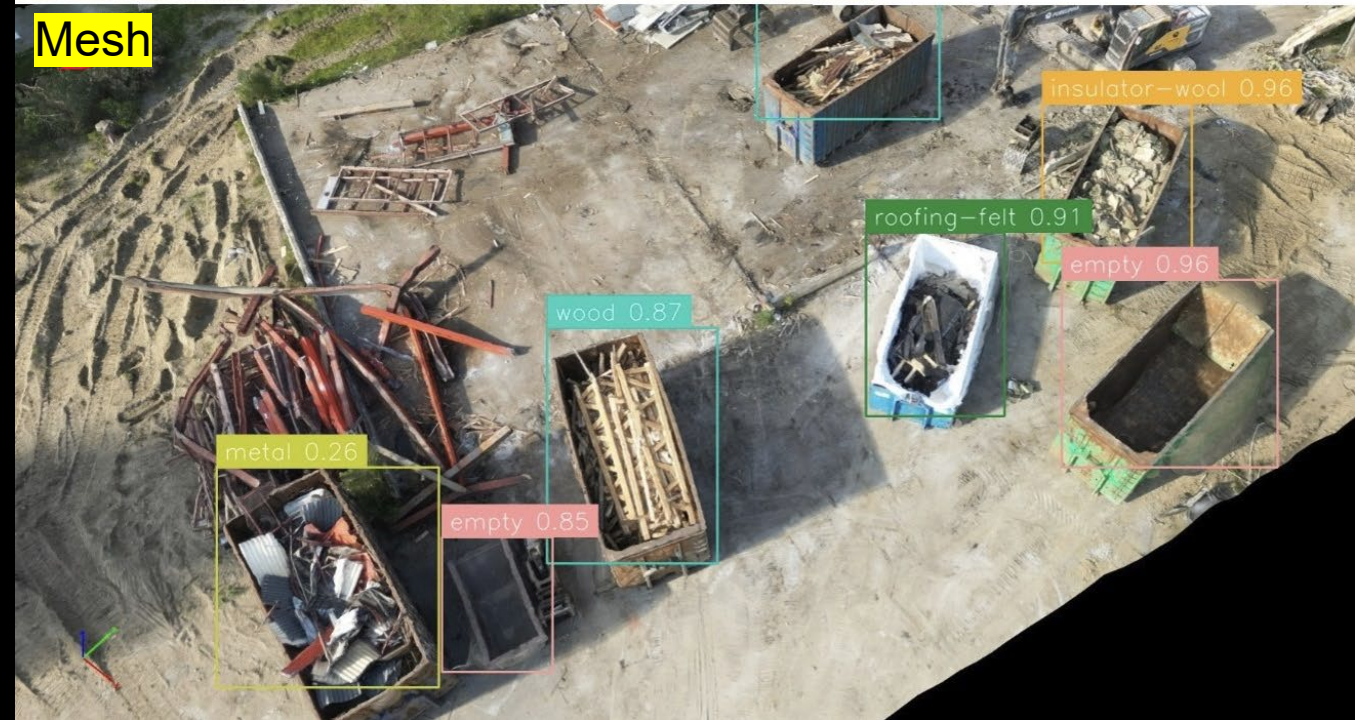
Ortokuva



Pistepilvi



Mesh



Havainnot valokuvilla testauksesta

Kuvan täytyy olla sopivalta etäisyydeltä otettu (vastaa koulutusaineistoa)

- 35–50 m korkeudelta kuvattu

Läheltä vaakatasoa otetut kuvat eivät toimi, vaikka materiaali näkyisi lavan yli

Ylitäytettyjen lavojen tunnistaminen on epävarmaa → Lavan reunat peittyvät?

Tunnistuksen epävarmuuteen saattaa vaikuttaa mm. valaistus ja varjot lavan päällä

Yleistäen: usein itse lavat tunnistetaan, mutta materiaalipäätelmä voi olla väärä



Kuva: Kimmo Iso-Tuisku, käsitelty Roboflow-mallilla

Jatkokehityksen pohdintaa

Purkumateriaalien tunnistaminen ilmakuvista objektin tunnistusmallilla on mahdollista

Mallin jatkokoulutus yhä suuremmalla määrällä eri materiaaleja, eri kohteilta

- Jakeiden luokittelu/nimeäminen jätelainsäädännön mukaisesti
- Myös talvella hankitut kuvat
- Eri materiaalien tasapuolinen edustavuus on haaste työmaaympäristössä

Valmiin mallin hyödyntäminen suoraan droonin kameranäkymästä

- Reaaliaikainen tunnistus purkutyömaan yli lennettäessä

Pidemmän aikavälin visio: Droonipesän yhdistäminen purkutoimintaan

- Automatisoitu lento-/kuvaustoiminta ja materiaalien luokittelu/mittaus
 - Raportti havaituista materiaalmääristä lennon jälkeen
- Vaatii lainsäädännön puolelta vielä paljon selvittelyä

Malli testattavissa vapaasti: <https://universe.roboflow.com/xamk-ymputki/cdw-materials>



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu



Tunne huomisen.